

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2020.06.01

微涡轮气体轴承测试技术研究进展

刘仁开¹, 张小青¹, 王丽²

(1. 北京工商大学 人工智能学院, 北京 100048; 2. 航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 微涡轮发动机具有重量轻、尺度小、功率密度高、无需充电等优点, 是微型机械设备动力源的最佳选择, 具有良好的应用前景。微涡轮发动机的转子直径在十几毫米至几十毫米, 设计转速一般在每分钟几十万转至一百万转以上, 功率目标在 100 W 以内。超高速微轴承-转子系统的摩擦与润滑问题是微涡轮发动机面临的瓶颈, 目前微涡轮发动机大都采用气体润滑轴承。本文对微涡轮发动机的研究现状进行了分类总结, 并重点回顾了气体轴承测试系统的研究成果, 对测试技术的发展趋势进行了展望。

关键词: 微涡轮发动机; 气体润滑轴承; 惯性轴承; 测试系统

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2020)06-0001-08

Research Progress of Gas Bearing Test Technology for Micro Turbine

LIU Renkai¹, ZHANG Xiaoqing¹, WANG Li²

(1. School of Artificial Intelligence, Beijing Technology And Business University, Beijing 100048, China;

2. Beijing Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Micro turbine engine has the advantages of light weight, small scale, high power density and no need of charging. It is the best choice of power source for micro mechanical equipment and has a good application prospect. The rotor diameter of micro turbine engine is in the range of more than 10 mm to dozens of mm. The design speed is generally from hundreds of thousands to more than one million rpm, and the power density target is within 100 W. The friction and lubrication problems of ultra-high speed micro bearing rotor system are the bottleneck of micro turbine engine. At present, gas lubricated bearings are mostly used in micro turbine engines. In this paper, the research status of micro turbine engine is classified and summarized, the research results of gas bearing test system are reviewed, and the development trend of test technology is prospected.

Key words: micro turbine engine; gas lubrication bearing; inertia bearing; test system

0 引言

微涡轮发动机(MTE, Micro Turbine Engine)是一种典型的 Power MEMS 器件^[1-5], 它消耗碳氢燃料, 产生的高温高压气体通过涡轮叶片驱动微转子高速旋转, 进而输出能量。微涡轮发动机的尺度在厘米量级, 能产生几十瓦的能量, 与其他动力系统相比, 微涡轮发动机具有重量轻、尺度小、功率密度高的特点, 发展潜力和应用前景良好^[6-10]。

超高速微轴承-转子系统的摩擦与润滑问题是当前微涡轮发动机面临的瓶颈。为实现高能量密度, 微型涡轮发动机中转子的转速往往要达到每分钟几十万转以上。这种转速下, 普通的滚动轴承和液体轴承将遭遇磨损、发热、摩擦阻力大等诸多问题, 很难实现正常的运转。气体润滑轴承因具有精度高、摩擦力极小、磨损小、寿命长等优点, 是支撑微涡轮发动机中高速

转子的优选之一, 应用较为普遍。至今为止, 国内外都对微涡轮发动机气体润滑轴承进行了不同方向和不同层次的研究, 在理论以及应用上也逐渐趋于完善。本文将重点针对微涡轮发动机气体轴承测试技术的研究进行概况总结, 为以后研究者进行该方面的研究提供参考。

1 微型涡轮发动机概述

微涡轮发动机大致分为: 三维叶片结构的微涡轮发动机和基于 MEMS 微加工技术的直壁叶片结构硅基微涡轮发动机。三维叶片结构的微涡轮发动机一般是轴流机制, 原理与大型涡轮发动机类似, 采用精密机械加工技术或快速原型技术制作出的, 这类微涡轮发动机较后者输出功率更大, 适用于为多种微型飞行器提供能源。直壁叶片结构硅基微涡轮发动机利用硅微刻蚀技术, 其叶片结构和形状是直壁结构, 其气流轨迹和特性同常规

涡轮发动机有着明显的区别,并且转子通常较多运用径流方式驱动。

1.1 三维叶片结构的微涡轮发动机

很多研究机构借助 EDM 技术(电火花加工)加工出复杂的三维叶片。比利时鲁汶大学于 2002 年开始研制微型涡轮发动机^[11-12],如图 1 所示。该微型发动机包括压气机、涡轮、燃烧室和起动机等部分。发动机的材料为不锈钢,采用电火花成形加工,发动机的质量是 36 g,转子直径 10 mm,压气机直径 20 mm,共 20 个叶片,设计转速 2.1×10^5 r/min,实际能达到的转速为 1.3×10^5 r/min,产生 28 W 机械能,效率在 20%~24% 之间。

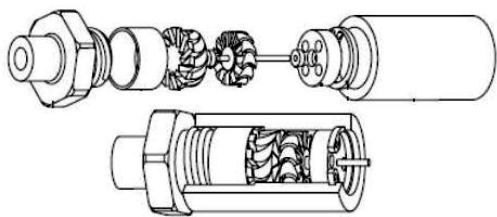


图 1 轴流式微型涡轮发动机结构图

图 2 为其涡轮和压气机实物图。日本的东北大学与某研究团队采用特种加工技术,制作出了基于金属材料的微发动机^[12-17]。此微发动机燃料是氢和甲烷,叶轮外径为 10 mm,如图 3 所示。该发动机设计转速是 8.7×10^5 r/min,目标是实现 100 W 量级的输出功率。



图 2 压气机样机及轴承转子部件

美国加州大学伯克利分校研制了一种汪克尔微型转子发动机,如图 4 所示。发动机燃烧室的体积约为 1 mm^3 ,转子直径是 9.5 mm,能够产生 10~100 mW 的机械功率^[18]。澳大利亚某公司^[19]为了避免核反应堆反应剧烈造成温度过高引发核泄露事故,设计并研发了一个用于核反应堆冷却的涡轮发动机如图 5 所示,此发动机采用了箔片气体轴承。

斯坦福大学的快速成型实验室和亚利桑那州某公

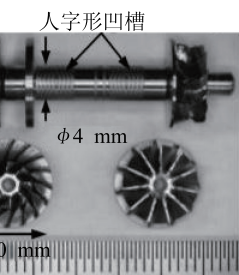
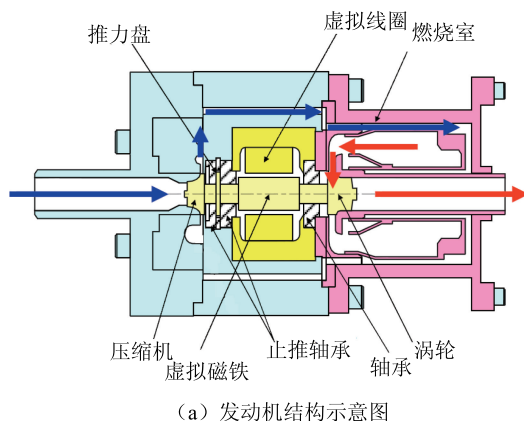


图 3 日本东北大学研发的微发动机^[16]

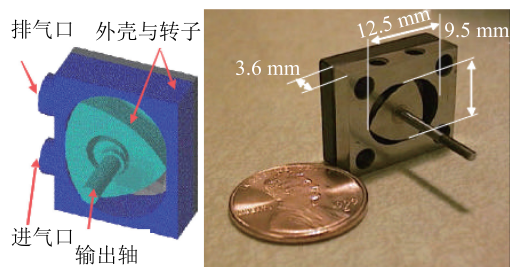


图 4 汪克尔微型转子发动机^[20]

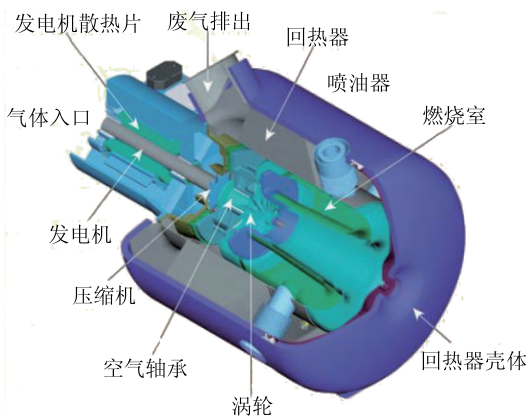


图 5 微涡轮发动机^[21]

司合作研制了一种外径约 50 mm 的微型涡轮发动机, 如图 6 所示, 设计转速 $0.5 \sim 1 \times 10^5 \text{ r/min}$, 推力约 5 N, 功率 100 W, 材料为 Si_3N_4 陶瓷, 并使用快速成型方法加工^[20]。

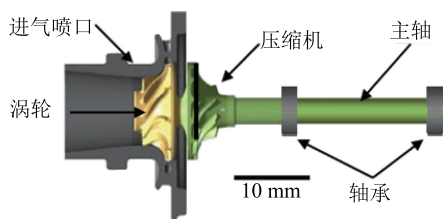


图6 陶瓷材料微型涡轮发动机^[22]

国内的一些机构也相继开展了微涡轮发动机的相关研究。如清华大学、北京理工大学^[21-22], 搭建实验台研究了空气槽对平板微型 Swiss-roll 燃烧器工作特性的影响, 同时对燃烧器散热和温度分布梯度做了总结归纳; 浙江大学^[23-24]对微尺度下的燃烧特性进行了实验研究, 比对在常规尺度燃烧的火焰温度、流量和燃烧效率。上海交通大学^[25]给出了一种针对微型发动机燃烧方案。上述的研究为微涡轮发动机提供了更多的理论支撑, 使得微涡轮发动机的设计更加成熟与完善。

南京航空航天大学对微型涡轮发动机多个特性进行分析, 如振动特性等^[26-29]。中国科学院广州能源研究所^[30]以及北京航空航天大学等科研院所^[31-32]总结了小型发动机涡轮的气动设计准则, 针对微小型涡喷发动机转子系统的涡动以及稳定性问题提出了一种涡动控制方法设计并进行了研究; 其中南京航空航天大学微型发动机研究与发展中心已经研发了 MTE-110 与 MTE-120 (数字编号代表转子直径, 单位为 mm) 型号的微发动机^[27]。该微涡轮发动机的转子设计转速为 10^5 r/min , 使用的是液态碳氢燃料, 主要材料由合金以及钢和铝构成。

目前, 微涡轮发动机的研究热点主要集中在透平性能改进方面。Li Zhenpeng 等人^[32]发展了一个考虑壁面传热效应的热力分析模型, 分析了关键参数对透平性能的影响, 并用新速度三角形模型改进透平设计。D'souza Rohann 等人^[34]对转子直径为 30 mm 的经 3D 打印技术制成的微涡轮发动机进行了加速、减速以及稳态测试, 当转子转速是 $6.9 \times 10^4 \text{ r/min}$ 时, 最多能产生 15 W 的功率输出。其热循环效率约为 18.6%。微涡轮发动机未来的发展方向将在功率的提升、转速的升高及加工技术的改善方面。

1.2 直壁叶片结构的微涡轮发动机

美国麻省理工学院的学者研制了基于硅微加工技术的微发动机^[35-39], 如图 7 所示。每片硅片事先通过深层离子刻蚀技术 (Deep Reactive Ion Etching, 简称 DRIE) 蚀刻出厚度不同的特征, 键合在一起形成一种准三维结构, 如图 8, 其叶片是直壁结构。其转子直径为 4.2 mm, 该器件重量大约是 1.5 g, 厚度约为 3.7 mm, 转子直径为 4.2 mm, 每小时大约燃烧 20 g 的燃料, 能产生大约 20 W 的功率, 功率密度可达 2 kW/kg 以上, 设计转速高达 $1.2 \times 10^6 \text{ r/min}$ ^[40]。

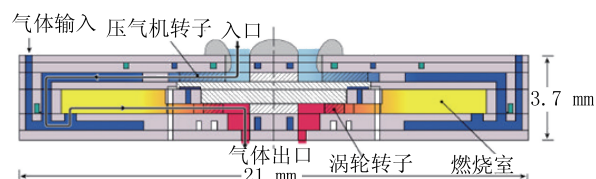


图7 硅基微发动机结构示意图^[36]



图8 组成发动机的硅片及叶片部分放大图^[40]

开展硅基微涡轮发动机研究的还有新加坡制造工艺研究所及新加坡数据存储研究所等机构^[41-45], 研制的微涡轮发动机的结构如图 9 所示。该发动机的转子

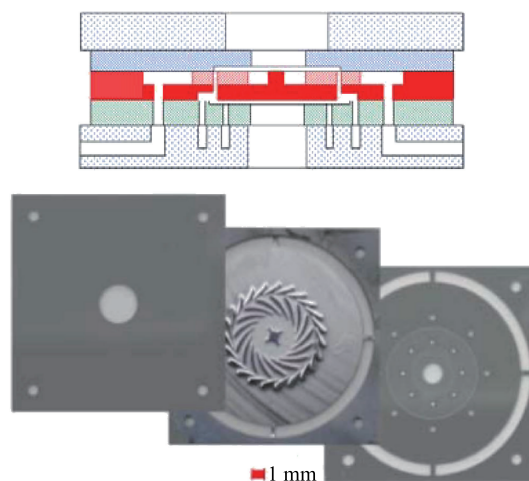


图9 硅基微发动机^[41-42]

直径为 8.4 mm、厚度为 0.76 mm, 实现了 1.47×10^4 r/min 的转速。从加工角度看, 这类硅基微发动机采用 MEMS 微加工技术, 可以实现批量生产, 大大降低加工成本。

2 气体润滑轴承测试技术研究进展

气体润滑轴承的概念最早在 1854 年由法国学者 Hirn G A 提出, 之后学者们相继开展研究。在 1913 年, Harrison W J 在连续方程的基础上引入气体的气体压缩性, 推导出了可压缩 Reynolds 方程, 成为气体润滑的理论基础。微发动机中的气体轴承具有尺度小、转速高的特点, 与常规气体润滑相比, 还存在一些稀薄效应^[46]、气体黏度^[47]、硅微加工缺陷^[48]等特殊问题。本小节对气体润滑轴承-转子系统测试技术的研究进展进行概况总结。

2.1 惯性气体轴承的测试研究

日本东北大学在其微发动机项目中^[49], 采用了气体惯性轴承支撑转子, 原因是气体惯性轴承比气体动压轴承的气膜间隙大, 因此对加工精度要求相对较低, 更容易加工, 且惯性轴承在高速时具有更好的抗涡动稳定性。他们开发了测试平台对惯性轴承系统进行了测试, 如图 10 所示, 在该测试平台中, 径向轴承间隙为 $31 \mu\text{m}$, 推力轴承的间隙为 $17 \mu\text{m}$, 转子转速由光纤位移传感器测得, 转子的径向振动由电涡流位移传感

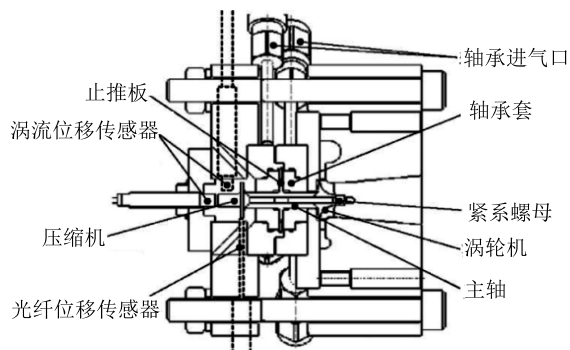


图 10 微涡轮发动机气体润滑轴承测试台^[49]

器测得。转子直径是 10 mm, 叶片最小厚度只有 0.1 mm, 转子材料是 Ti-6Al-4V。在测试中, 实现了最大转速 8.9×10^5 r/min, 叶尖线速度达到了约 470 m/s。他们发现, 通过减小不同轴承宽径比 (L/D) 能实现更高的转速, 但宽径比的改变对涡动比的影响不大; 径向轴承两个供气口供气压力不一致对轴承涡动稳定性影响不大, 但这种不一致性可以用于节约气体。

2.2 硅基气体轴承测试研究

为测试图 7 所示微发动机的轴承转子系统, Teo C J 和 Liu L X 等人^[50-53]将轴承系统从原发动机剥离出来, 去除燃烧室, 而用高压气体替代原燃烧室气体作为轴承系统的气源, 其它部位保持与原结构相同, 加工制作了微轴承测试器件(如图 11 所示)。与原微涡轮发动机相同, 轴承测试器中的转子由两个推力轴承及一个轴向供气的径向轴承支撑。受硅片厚度及硅蚀刻技术所限, 径向轴承的长度为 $300 \sim 400 \mu\text{m}$, 径向轴承气体来自于四个压力室, 设计转速为 2.4×10^6 r/min。为了让转子的稳定性得到有效的提高, 他们在径向轴承供气时运用不对称性来降低转子升速过程中固有频率的振幅。同时采用了迷宫式密封设计, 使转子流体动力学效应与泄露流动的耦合效应得到了有效的避免, 提高了系统的稳定性, 该设备达到了 1.7×10^6 r/min 的转速。在实验中, 主要获得了系统的气体质量流量、动力学响应等特性, 并建立了更加成熟的稳定升速策略。Zhang Q D 等人^[43-45]采用了气体动压螺旋槽推力轴承(如图 13), 在实验中实现了 1.47×10^4 r/min 的转速。

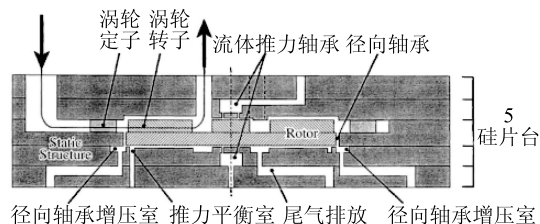


图 11 硅基微轴承测试器件

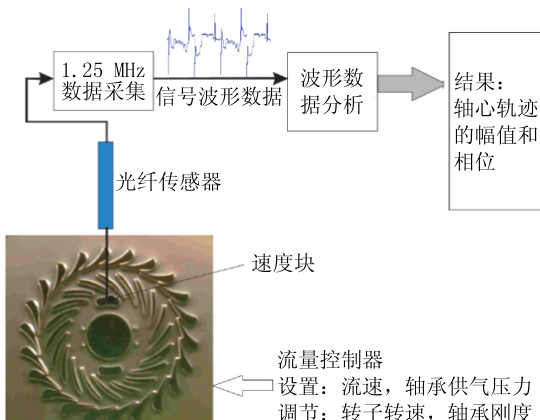


图 12 硅基微轴承转子测试原理图

2.3 MEMS 在测试系统中的发展

MEMS 技术最早可以追溯到上个世纪, 1824 年,

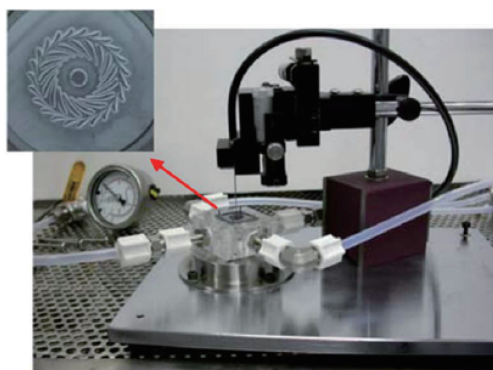


图 13 微气体轴承测试台

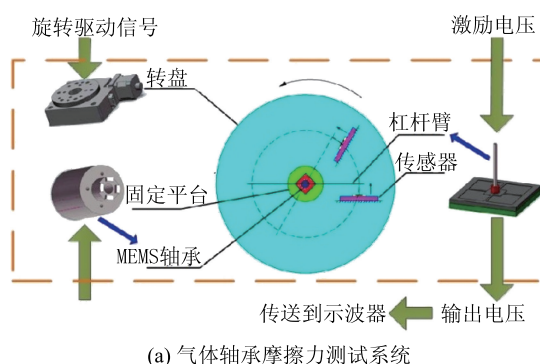
硅这种材料的发现，为 MEMS 技术的可行性奠定了基础。1959 美籍犹太裔物理学家费曼提出 MEMS 的概念，20 世纪 60 年代，利用半导体材料硅制作的微型压力传感器诞生，20 世纪 80 年代到 20 世纪末，传感器经过了压阻式到电容式的技术革新，至今为止 MEMS 在生物学、声学、光学等各个领域都有涉及。相较于传统的机械传感器，MEMS 的尺寸小得多，这也让 MEMS 在一些特殊情况下能完成传统传感器不能完成的功能^[54]。

近年来 MEMS 传感器技术开始用于微气体轴承的测试。Liu Huan 等人^[55]开发了梁膜结构的 MEMS 力传感器，用于检测微气体轴承的黏性摩擦力的大小。该传感器将传统的梁结构及膜结构结合在一起，兼具高稳定性及高灵敏度的优点。该传感器的原理是将不锈钢探针检测到的摩擦力信号通过压敏效应转换为电压信号，再经过换算求得摩擦力值。在实验中，转子从静止逐渐升速至 $1(^{\circ})/s$ 的过程中，摩擦力在启动阶段达到最大值 16.314 mN，转子稳定运转后摩擦力也趋于稳定，平均摩擦力为 5.937 mN (对应的摩擦力矩为 $29.685 \mu N \cdot m$)。

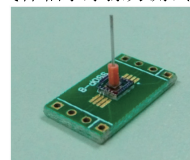
2.4 人工智能技术在测试系统中的发展

在 70 年代末期到 80 年代初，随着计算机以及电子通信的高度发展，有限元、计算机辅助设计等现代设计方法运用在气体润滑轴承测试系统中^[56]。21 世纪，人工智能的崛起标志着世界进入工业 4.0 时代。随着计算机、电子信息科学等应用领域迅猛发展，机器学习作为人工智能的核心智慧，为气体润滑轴承系统化提供了方法学上的新思路。

Gorasso^[57]在研究优化轴承参数上提供了一种新的思路，为了对轴承结构参数进行优化，利用神经网络算法，创建了一个可以计算轴承润滑剂流量、功率消耗等数据的模型，然后利用该数据模型，控制最



(a) 气体轴承摩擦力测试系统



(b) MEMS 传感器

图 14 气体轴承摩擦力测试系统及 MEMS 传感器

大温升、表面粗糙度和材料极限性能为变量进行算法分析，分析结果与实验数据进行比对从而找到降低轴承流量、减少功率消耗的轴承优化参数。

Pavlenko I 等人^[58]提出了神经网络“虚拟基因开发”软件，通过上述软件中的数值模拟结果来评估近似曲线“轴承刚度-转子转速”的运行参数。非线性轴承刚度的实际参数由多级离心压缩机 295GC2-190/44-100 M 在“申克”加速平衡试验台上的转子临界频率试验研究结果获得。

3 总结与展望

微涡轮发动机具有广阔的应用前景，对其进行研究发展具有重要意义。本文对国内外微涡轮发动机及其气体轴承测试研究现状进行了总结，主要结论如下：

1) 微发动机的设计转速一般在每分钟几十万转至一百万转以上，功率目标在 100 W 以内。根据叶片外形特征，微涡轮发动机可分为三维叶片结构及准二维直壁结构两大类；前者往往基于微细加工技术或快速成型技术制作，后者则通过硅微加工工艺加工；前者一般是轴流机制，后者多为径流机制。

2) 轴承仍是制约微发动机发展的关键部件，目前学术界提到的微发动机，大都采用气体润滑轴承，如箔片轴承、螺旋槽动压轴承、惯性轴承等。

3) 微型轴承主要朝着精密、低音等方向发展，因此未来的发展方向是精密轴承。鉴于精密轴承的应用广泛，各行各业的发展对轴承的精度、性能、寿命和可靠度等方面的要求越来越高，需要的数量也越来越

多,但国内在精密微型轴承生产方面仍是薄弱环节。

4) 相对于理论研究,有关气体润滑的测试研究较少,处于发展阶段。现有研究有的主要针对实验台搭建,有的是针对气体供气策略对轴承-转子系统的影响,有的测试了轴承黏性摩擦力,在测试技术还需要运用多方面的技术为检测提供新的方法。

5) 人工智能技术及 MEMS 传感器技术逐渐开始应用于气体轴承的测试,这是轴承测试技术的一个发展趋势。针对我国轴承行业生产集中度低、研发和创新能力低以及制造水平低等现状,中国轴承工业协会制定了一系列措施,以促进我国轴承工业的发展。协会将推进行业的产业结构调整,从攻关、技术上提高产品质量,大力推行产学研联合的道路,重视和抓好精密制造、智能制造、数字制造和微纳米制造等关键技术。

越来越多的新技术、新手段将会应用于气体润滑轴承测试研究方面,以协助制定合理的加工要求及控制策略,使气体轴承实现高速稳定运转成为可能。近年来,我国国内机床行业、汽车行业发展很快,为适应产品升级换代的需求和替代进口,我国精密微型轴承产品市场前景广阔,应当抓好先进工艺及装备的推广应用,组织行业继续深入开展共性技术攻关。

参 考 文 献

- [1] Feynman R P. There's Plenty of Room at the Bottom[J]. Journal of Microelectromechanical systems, 1992, 1(1): 60-66.
- [2] Whalen S, Thompson M, Bahr D. Design, Fabrication and Testing of the P-3 Micro Heat Engine [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2003, 104(3): 290-298.
- [3] London A P, Epstein A H, Kerrebrock J L. High-pressure Bipropellant Microrocket Engine [J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 17(4): 780-787.
- [4] Thompson M, Whalen S, Richards C, et al. Design, Fabrication, and Testing of a Micro Heat Engine [C]//Nanotech 2002 - at the Edge of Revolution, 2003.
- [5] Skinner J, Olson A, Bahr D, et al. A Piezoelectric Membrane Generator for MEMS Power. NanoTech 2002 - "At the Edge of Revolution", 2002.
- [6] 王琪民. 微型机械导论[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2003.
- [7] 刘广玉, 樊尚春, 周浩敏. 微机械电子系统及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [8] Fujita H. Microactuators and Micromachines [C]//Proceedings of IEEE, 1998, 86(8): 1721-1732.
- [9] Livermore C, Anthony R F, Theodore L, et al. A High-Power MEMS Electric Induction Motor [J]. Journal of Micro-electromechanical Systems, 2004, 13(3): 465-471.
- [10] Senturia S D. Simulation and Design of Microsystems: A 10-year Perspective[J]. Sensors and Actuators A: physical, 1998, 67: 1-7.
- [11] Peirs J, Reynaerts D, Verplaetsen F. A Microturbine for Electric Power Generation[J]. Sensors and Actuators A: physical, 2004, 113(1): 86-93.
- [12] Peirs J, Reynaerts D, Verplaetsen F A. Development of an Axial Microturbine for a Portable Gas Turbine Generator[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2003, 13(4): 190-195.
- [13] Tanaka S, Hikichi K, Togo S, et al. World's Smallest Gas Turbine Establishing Brayton Cycle [C]//The 7th international workshop on micro and nanotechnology for power generation and energy conversion application, 2007: 359-362.
- [14] Kousuke I, Shuji T, Shinichi T, et al. Development of Micromachine Gas Turbine for Portable Power Generation [J]. JSME International Journal Series B, Fluids and Thermal Engineering, 2004, 47(3): 459-464.
- [15] Kousuke I, Shinichi T, Kousuke H, et al. Analytical and Experimental Study of Hydroinertia Gas Bearings for Micromachine Gas Turbines [C]//NEW YORK: Proceedings of the ASME Turbo Expo, Power for Land, Sea and Air, 2005: 1-9.
- [16] Kousuke I, Shuji T, Shinichi T, et al. Development of High-Speed Micro-Gas Bearings for Three-dimensional Micro-turbo Machines [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2005, 15(9): 222-227.
- [17] Isomura K, Murayama M, Teramoto S, et al. Experimental Verification of the Feasibility of a 100 W Class Micro-Scale Gas Turbine at an Impeller Diameter of 10 mm [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2006, 16(9): 254-261.
- [18] Chigier N, Gemci T. A Review of Micro Propulsion Technology [C]//41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2003.
- [19] Almasi A. New Application of Micro-Turbine: Nuclear Emergency Cooling [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A Journal of Power & Energy, 2012, 226(8): 1076-1080.
- [20] Wien T, Liu H C, Kang S, et al. Fabrication of Ceramic Components for Micro Gas Turbine Engines [C]//Proceedings of Ceramic Engineering and Science, 2002, 23(4): 43-50.
- [21] 李军伟, 钟北京, 王建华, 等. 空气槽对微型 Swiss-Roll 燃烧器工作特性的影响 [J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(2): 140-144.
- [22] 李军伟, 钟北京. 微细直管燃烧器的散热损失研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(20): 59-64.

- [23] 张永生, 周俊虎, 杨卫娟, 等. 微燃烧稳定性分析和微细管道燃烧实验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(7): 1178–1182.
- [24] 周俊虎, 刘茂省, 杨卫娟, 等. 微燃烧发动机应用于微型飞行器的性能分析[J]. 燃烧科学与技术, 2006, 12(3): 193–197.
- [25] 胡国新, 王明磊. 微细通道内可燃气体预混燃烧实验与微型发动机燃烧方案[J]. 热能动力工程, 2003, 18(4): 352–355.
- [26] 梁德旺, 黄国平. 厘米级微型涡轮喷气发动机主要研究进展[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2004, 17(2): 9–13.
- [27] 黄国平, 梁德旺, 何志强. 大型飞机辅助动力装置与微型涡轮发动机技术特点对比[J]. 航空动力学报, 2008, 23(2): 383–388.
- [28] 戚峰. 微尺度射流、平板边界层及叶栅流动实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- [29] 唐振寰. 微型发动机整机振动分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [30] 徐进良, 胡建军, 曹海亮. 微燃烧透平发电系统的研制及性能测试[J]. 中国机械工程, 2008, 19(12): 1399–1405.
- [31] 周杨, 刘火星, 邹正平. 微小型发动机涡轮气动设计研究[J]. 推进技术, 2010, 31(1): 64–69.
- [32] 郑东亚, 杜发荣, 丁水汀, 等. 微小型涡喷发动机转子涡动控制方法研究[J]. 推进技术, 2010, 31(1): 52–55.
- [33] Li Z P, Zou Z P, Yao L C, et al. Aerodynamic Design Method of Micro-scale Radial Turbines Considering the Effect of Wall Heat Transfer[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 138: 94–109.
- [34] Dsouza R, Sharma R N. An Experimental Study of an Ultra-micro Scale Gas "Turbine" [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 163: 114349.
- [35] Epstein A H. Micro-Engines Scholar Lecture[J]. ASME Journal of Turbo-machinery, 2004, 5(2): 204–211.
- [36] Epstein A H. Millimeter-Scale Micro-Electro-Mechanical Systems Gas Turbine Engines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(4): 205–226.
- [37] Lin C C. Development of a Microfabricated Turbine-Driven Air Bearing Rig[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [38] Epstein A H, Senturia S D. Power MEMS and Micro Engines[C]//International Conference on Solid State Sensors and Actuators. IEEE, 1997.
- [39] Epstein A H, Senturia S D. Macro Power from Micro Machinery[J]. Science, 1997, 276(5316): 1211.
- [40] Mehra A, Zhan X, Ayon A A. A Six-wafer Combustion System for a Silicon Micro Gas Turbine Engine[J]. Microelectromechanical Systems, 2000, 9(4): 517–527.
- [41] Shan X C, Zhang Q D, Sun Y F, et al. Design, Fabrication and Characterization of an Air-driven Micro Turbine Device[J]. Journal of Physics Conference, 2006, 34: 316–321.
- [42] Shan X C, Zhang Q D, Sun Y F, et al. Studies on a Micro Turbine Device with Both Journal and Thrust air Bearings[J]. Microsystem Technologies, 2007, 13: 1501–1508.
- [43] Zhang Q D, Shan X C, Guo G X, et al. Performance Analysis of Air Bearing in a Micro System[J]. Materials Science and Engineering, 2006, 423: 225–229.
- [44] Zhang Q D, Shan X C. Dynamic Characteristics of Micro Air Bearings for Microsystems[J]. Microsyst Technol, 2008, 14: 229–234.
- [45] Zhang Q D, Shan X C. Micro Air Bearing for a Microturbine[J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8(5): 435–440.
- [46] Liu R, Wang X L, Zhang X Q. Effects of Gas Rarefaction on Dynamic Characteristics of Micro Spiral-Grooved Thrust Bearing[J]. Journal of Tribology, 2012, 134(2): 222011–222017.
- [47] Zhang X Q, Wang X L, Zhang Y Y. Non-linear Dynamic Analysis of the Ultra-short Micro Gas Journal Bearing-Rotor Systems Considering Viscous Friction Effects[J]. Nonlinear Dynamics, 2013, 73(1–2): 751–765.
- [48] Zhang X Q, Wang X L, Liu R, et al. Modeling and Analysis of Micro Hybrid Gas Spiral-Grooved Thrust Bearing for Micro-engine[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2013, 135(12): 122508.
- [49] Tanaka S, Esashi M, Isomura K, et al. Hydroinertia Gas Bearing System to Achieve 470m/s Tip Speed of 10 mm-diameter Impellers[J]. Journal of Tribology, 2007, 129(3): 655–659.
- [50] Teo C J, Spakovszky Z S. Modeling and Experimental Investigation of Micro-hydrostatic Gas Thrust Bearings for Micro-turbomachines[J]. Journal of turbomachinery, 2006, 128: 597–605.
- [51] Liu L X, Teo C J, Epstein A H, et al. Hydrostatic Gas Journal Bearings for Micro-turbomachinery[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2005, 127: 157–164.
- [52] Liu L X, Spakovszky Z S. Effects of Bearing Stiffness Anisotropy on Hydrostatic Micro Gas Journal Bearing Dynamic Behavior[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2007, 129: 177–184.
- [53] Teo C J, Liu L X, Li H Q, et al. High-Speed Operation of a Gas-bearing Supported MEMS Air Turbine[J]. Journal of Tribology, 2009, 131(3): 1303–1314.

- [54] 何成奎. MEMS 传感器研究现状与发展趋势[J]. 农业开发与装备, 2020(8): 27-29.
- [55] Liu H, Yu Z L, Liu Y, et al. A Micro-Force Sensor with Beam-Membrane Structure for Measurement of Friction Torque in Rotating MEMS Machines[J]. Micromachines, 2017, 8(10).
- [56] 李树森, 张鹏顺, 曲全利. 气体润滑轴承技术的应用及发展趋势[J]. 润滑与密封, 1999(2): 3-5.
- [57] 基于人工智能算法和 CFD 仿真的滑动轴承优化设计[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [58] Pavlenko I, Simonovskiy V, Ivanov V, et al. Application of Artificial Neural Network for Identification of Bearing Stiffness Characteristics in Rotor Dynamics Analysis [M]//Advances in Design, Simulation and Manufacturing 2019.

收稿日期: 2020-10-20; 修回日期: 2020-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51605008)

作者简介

刘仁开(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微气体润滑轴承。



动态计量校准与测试技术交流研讨会在银川顺利举办

本刊讯 2020年11月4日至6日, 为期三天的“动态计量校准与测试交流研讨会”在富有传奇色彩的银川市顺利召开, 本次大会由中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所、“计量与校准技术”重点实验室、中国航空学会计量技术分会、“动态测试与校准技术”航空科技重点实验室联合主办, 由《计测技术》和中国计量测控网承办。来自于高校、民用工业、地方质量技术监督部门、测量设备制造商等单位的近两百位专家代表听取了动态计量校准与测试技术最新研究进展、关键问题解析、振动、温度、次声等多种动态问题的深度解析报告, 并以中国科协发布的重大科学问题与工程技术难题“面向工程应用的高精度动态测量”为主题进行了深入而广泛的讨论。

本次主办单位之一的航空工业计量所在80年代就开始了动态计量测试方面的研究。对力学、热学、几何量中动态校准技术的难点和热点问题, 有比较深入的洞察和研究。与会领导表示愿与兄弟单位、高校、用户、制造商一起, 共同推进动态校准与测试技术的超前发展。

今年, 中国面临着严峻的国际国内形势, 面临着新的历史机遇与挑战, 在这“十三五”规划收官和“十四五”谋篇布局的关键节点上, 为了实现“十四五”期间高质量发展, 动态计量校准与测试技术需要总结过去、立足现在、展望未来。本次会议成功搭建了一个交流平台, 使得线上、线下关注动态校准与测试技术的科研院所、高校、用户和制造商充分交流, 就发展此项技术的难点和方向取得基本共识, 参会代表一致表示希望通过共同努力, 争取在“十四五”期间推动动态校准与测试技术实现较大进展, 应用获得明显成效。

2020动态计量校准与测试技术交流研讨会

2020年11月 银川

